

永磁无刷直流电机 控制技术与应用

刘刚 王志强 房建成 著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TM351/2

2008

永磁无刷直流电机 控制技术与应用

刘 刚 王志强 房建成 著

机械工业出版社

随着科学技术的不断发展,对永磁无刷直流电机调速系统转速和转矩的性能要求越来越高。各种传统的控制方法也伴随着科学发展和技术进步不断更新,许多经典的控制方法在新技术硬件平台上获得了比以往更优良的性能。特别是数字信号处理器和可编程逻辑器件出现,极大地推动了永磁无刷直流电机控制技术不断向集成化、智能化方向发展。

本书共9章。第1章概括地介绍了永磁无刷直流电机的结构、原理、调速性能、控制方法以及在磁悬浮飞轮中的应用;第2章建立了永磁无刷直流电机系统模型,以验证各种先进的电机控制方法的应用效果;第3章系统地介绍了永磁无刷直流电机的电子电路,这部分内容是作者十几年来从事永磁无刷直流电机控制系统研制工作的总结;第4章对转矩脉动进行了分析,介绍了各种抑制转矩脉动的方法,同时针对高速永磁无刷直流电机的低功耗驱动问题,提出了降低电机铁耗的控制方法;第5章介绍了基于锁相环的高精度转速控制方法;第6章介绍了小电枢电感永磁无刷直流电机的无位置传感器控制方法;第7章针对永磁无刷直流电机伺服系统,介绍了高性能数字控制方法;第8章介绍了永磁无刷直流电机在磁悬浮储能飞轮中的应用;第9章,以高速磁悬浮飞轮用永磁无刷直流电机为例,介绍了永磁无刷直流电机磁场的分析和计算方法。

本书既适用于永磁无刷直流电机控制系统的设计和研发人员,又可作为工程技术人员的技术参考书和高校相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

永磁无刷直流电机控制技术与应用/刘刚,王志强,房建成著. —北京:机械工业出版社,2008.3

ISBN 978-7-111-23475-3

I. 永… II. ①刘…②王…③房… III. 永磁式电机:无刷电机:直流电机 IV. TM351

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第018184号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张俊红 版式设计:冉晓华 责任校对:陈延翔

封面设计:王奕文 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市明辉装订厂装订)

2008年4月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.125印张·430千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-23475-3

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

在国外,从20世纪70年代末,特别是80年代初以来,由于电子技术、计算机技术、传感器技术、电力电子技术、现代控制理论和新型永磁材料的发展,永磁无刷直流电动机及其控制技术已有突破性进展。近20年来,永磁无刷直流电机因其调速性能好、控制方法灵活多变、效率高、起动转矩大、运行寿命长等诸多优点,日趋广泛地应用于航空航天、计算机、军事、汽车、工业和家用电器等领域。

随着科学技术的不断发展,对永磁无刷直流电机调速系统性能要求越来越高,一种趋势是电机转速越来越高,从几千转提高到几万转,甚至几十万转,并且要求在高转速下还具有较高的转速控制精度,同时永磁无刷直流电机的高速转矩脉动抑制,成为与抑制其低速转矩脉动同等重要的问题。各种传统的控制方法也伴随着科学的发展和技术的进步不断更新,许多经典的控制方法在新技术硬件平台上获得了比以往更优良的性能。特别是数字信号处理器和可编程逻辑器件的广泛应用,极大地推动了永磁无刷直流电机控制技术的发展,使得控制平台更加趋于集成化、智能化。

本书共9章。第1章概括地介绍了永磁无刷直流电机的结构、原理、调速性能、控制方法以及在磁悬浮飞轮中的应用;第2章建立了永磁无刷直流电机系统模型,以验证各种先进的电机控制方法的应用效果;第3章系统地介绍了永磁无刷直流电机的电子电路,这部分内容是作者十几年来从事永磁无刷直流电机控制系统研制工作的总结;第4章对转矩脉动进行了分析,介绍了各种抑制转矩脉动的方法,同时针对高速永磁无刷直流电机的低功耗驱动问题,提出了降低电机铁耗的控制方法;第5章介绍了基于锁相环的高精度转速控制方法;第6章介绍了小电枢电感永磁无刷直流电机的无位置传感器控制方法;第7章针对永磁无刷直流电机伺服系统,介绍了高性能数字控制方法;第8章介绍了永磁无刷直流电机在磁悬浮储能飞轮中的应用;第9章,以高速磁悬浮飞轮用永磁无刷直流电机为例,介绍了永磁无刷直流电机电磁场的分析和计算方法。

本书第1章和第9章由房建成编写,第3章和第5章由王志强编写,其余章节由刘刚编写,全书由刘刚统稿。本书是作者及其课题组多年研究成果的结晶,除作者外,山东大学徐衍亮教授,北京航空航天大学郇吉臣教授、常庆之教授、赵建辉教授、李红副教授、韩邦成副教授、魏彤博士、张亮博士,以及博士生樊亚洪、田希晖、孙津济,硕士马会来、刘庆福、周勇、张利、姚嘉、夏旋、夏

IV 永磁无刷直流电机控制技术与应用

蕾、李建科、贾军、杨春帆、刘平等都先后参加了相关课题的研究工作。东北大学刘宗富教授和韩安荣教授审阅了本书。

另外，特别感谢周新秀、朱娜和刘建章为本书做出的工作。

需要说明的是，为了保证部分仿真图及元器件型号与实际效果一致，书中部分图形和文字符号并未按国家标准做统一处理，这点请广大读者引起注意。

作者感谢国家“863”计划办公室、国防科工委民用航天预研项目管理办公室、总装备部预研项目管理办公室以及北京航空航天大学在科研工作中给予的支持和帮助，感谢机械工业出版社在本书出版过程中给予的大力支持。最后，感谢在本书撰写过程中所有给予关心、帮助和支持的人们！

因作者水平有限，书中难免有错漏之处，恳请广大同行、读者批评指正。

作者

2008年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 无刷直流电机的特点	1
1.2 无刷直流电机的结构和工作原理	2
1.2.1 永磁无刷直流电机的结构	2
1.2.2 无刷直流电机的原理	5
1.2.3 转子位置传感器	8
1.3 无刷直流电机的运行特性	14
1.4 无刷直流电机的正反转	16
1.5 永磁无刷直流电机的设计	19
1.6 永磁无刷直流电机的控制	20
1.7 高速永磁无刷直流电机在磁悬浮飞轮中的应用	22
参考文献	29
第 2 章 永磁无刷直流电机的数学模型及仿真研究	31
2.1 永磁无刷直流电机的数学模型	31
2.2 永磁无刷直流电机的 Simulink 仿真	34
2.2.1 无刷直流电机模块	36
2.2.2 三相逆变桥模块	42
2.2.3 逻辑换相模块	42
2.2.4 控制模块	43
2.3 仿真结果	44
2.4 无刷直流电机模糊逻辑控制系统仿真	46
2.4.1 电机转速的模糊逻辑控制器设计方法	46
2.4.2 制作模糊控制响应表	49
2.4.3 模糊逻辑推理系统的仿真研究	54
2.5 本章小结	62
参考文献	62
第 3 章 永磁无刷直流电机的电子电路	64
3.1 永磁无刷直流电机的功率放大电路	64
3.1.1 功率晶体管放大电路设计	64
3.1.2 功率 MOSFET 驱动电路设计	66
3.2 永磁无刷直流电机控制专用集成电路	71

VI 永磁无刷直流电机控制技术与应用

3.2.1	MC33035 引脚功能和主要参数介绍	73
3.2.2	MC33035 换相控制技术	74
3.2.3	MC33035 的过电流保护电路	76
3.2.4	MC33035 的驱动输出电路	77
3.2.5	基于 MC33035 的永磁无刷直流电机控制系统设计	78
3.3	永磁无刷直流电机数字控制电路	80
3.3.1	基于 TMS320LF2407A DSP 的控制电路	81
3.3.2	基于 TMS320F2812 DSP 的控制电路	89
3.3.3	基于 FPGA 的永磁无刷直流电机控制电路	93
3.4	本章小结	99
	参考文献	99
第 4 章	永磁无刷直流电机转矩脉动和铁耗抑制	101
4.1	永磁无刷直流电机的转矩脉动	101
4.1.1	永磁无刷直流电机的换相转矩脉动分析	101
4.1.2	永磁无刷直流电机的转矩脉动抑制方法	103
4.2	永磁无刷直流电机的铁耗分析	107
4.3	无刷直流电机变压控制系统	109
4.4	无刷直流电机双极性控制系统	116
4.4.1	双极性控制原理	116
4.4.2	控制系统组成	118
4.4.3	实验结果及分析	119
4.5	Buck 变换器电机控制系统	121
4.5.1	Buck 变换器电机控制系统设计与仿真	125
4.5.2	Buck 变换器的电机控制系统设计	127
4.5.3	基于 Buck 变换器的高速电机试验	129
4.5.4	Buck 变换器软开关电路分析与设计	130
4.6	本章小结	133
	参考文献	134
第 5 章	永磁无刷直流电机锁相环速度控制技术	137
5.1	锁相环速度控制原理	138
5.1.1	电机锁相转速控制系统的鉴相器	138
5.1.2	电机的转矩控制	140
5.2	电机专用锁相环控制器	140
5.2.1	TC9242 的引脚功能和主要参数介绍	141
5.2.2	TC9242 的工作原理	142
5.3	模拟电路锁相环速度控制系统	143
5.3.1	基于电流环和锁相环的电机双模速度控制系统	145
5.3.2	无刷直流电机恒流驱动研究	146

5.3.3	高转速电机稳速控制器设计	146
5.3.4	模块间自动切换电路的实现	149
5.4	永磁无刷直流电机锁相试验	152
5.4.1	永磁无刷直流电机升降速试验	152
5.4.2	永磁无刷直流电机锁相稳速试验	153
5.5	快速锁相稳速控制	155
5.5.1	电流环分析	156
5.5.2	快速锁相环电路	157
5.5.3	锁相稳速切换电路	159
5.6	无位置传感器无刷直流电机锁相环速度控制系统	160
5.7	软件锁相环速度控制参数优化设计	161
5.8	本章小结	166
	参考文献	166
第6章	无位置传感器永磁无刷直流电机控制	169
6.1	常用无位置传感器检测原理	169
6.1.1	反电动势过零点的检测方法	169
6.1.2	反电动势3次谐波检测方法	171
6.1.3	续流二极管导通检测方法	173
6.1.4	固定电压的检测方法	173
6.1.5	预测反电动势过零点的方法	174
6.2	TDA5142T 无位置传感器无刷直流电机专用控制器	175
6.2.1	TDA5142T 的调速原理	175
6.2.2	TDA5142T 的换相技术	176
6.2.3	TDA5142T 的起动技术	177
6.2.4	TDA5142T 电机速度控制电路	178
6.2.5	实验结果	178
6.3	ML4425 无位置传感器 BLDCM 控制器	180
6.3.1	无位置传感器永磁无刷直流电机控制器的选用	180
6.3.2	ML4425 引脚功能	180
6.3.3	ML4425 关键技术分析	183
6.3.4	ML4425 外围电路的参数选取	186
6.3.5	ML4425 应用于高速电机的起动技术	192
6.4	永磁无刷直流电机无位置传感器 DSP 控制系统	199
6.4.1	小电枢电感永磁无刷直流电机无位置传感器控制方法	199
6.4.2	无位置传感器检测硬件系统的实现	201
6.4.3	无位置传感器控制系统软件设计	211
6.4.4	实验结果与结论	215
6.5	本章小结	216

参考文献	217
第 7 章 稀土永磁无刷直流力矩电机控制	220
7.1 概述	220
7.2 无刷直流力矩电机伺服控制系统的硬件设计	222
7.2.1 硬件总体方案设计	222
7.2.2 控制电路设计	222
7.2.3 功率驱动电路设计	226
7.2.4 位置检测电路设计	227
7.3 伺服控制系统的软件设计	229
7.3.1 伺服控制系统的主程序结构	229
7.3.2 各子功能模块的实现	231
7.4 低速转矩脉动的分析和抑制	236
7.4.1 PWM-ON-PWM 调制	236
7.4.2 换相期间调制方式对转矩脉动的影响	238
7.4.3 PWM-ON-PWM 调制的应用局限	245
7.5 试验测试及结果分析	245
7.5.1 试验测试	246
7.5.2 试验结果分析	246
7.6 本章小结	249
参考文献	249
第 8 章 稀土永磁无刷直流电机发电运行控制	252
8.1 稀土永磁无刷直流电机发电运行	253
8.1.1 概述	253
8.1.2 能量转换方法	255
8.2 储能基本原理	256
8.2.1 储能飞轮系统能量流动简介	256
8.2.2 储能飞轮动能存储原理	257
8.3 储能飞轮基本组成	258
8.3.1 FES 的基本结构	258
8.3.2 FES 核心构件设计	259
8.4 发电运行的控制系统设计	261
8.4.1 控制原理及总体方案	261
8.4.2 系统的硬件设计	264
8.4.3 电路设计实现	266
8.4.4 系统的软件设计	279
8.4.5 控制算法的具体实现	281
8.5 试验测试及结果分析	285
8.6 本章小结	287

参考文献	288
第 9 章 新型永磁无刷直流电机电磁场的分析与计算	291
9.1 计算漏磁系数和极弧系数的意义	291
9.2 永磁无刷直流电机二维电磁场分析	292
9.2.1 分析模型	292
9.2.2 气隙径向磁场的分析及相关参数计算	293
9.2.3 气隙轴向磁场的分析及相关参数计算	294
9.2.4 电机气隙磁场的分析及相关参数计算	296
9.3 永磁无刷直流电机三维电磁场分析	296
9.3.1 分析模型	297
9.3.2 等效气隙磁通密度计算系数	298
9.3.3 等效漏磁系数	299
9.3.4 计算结果	300
9.4 相关讨论	300
9.4.1 隔磁环对电机磁场的影响	300
9.4.2 Halbach 磁体结构电机的电磁场研究	303
9.5 样机电磁设计及结果分析	314
9.5.1 电机二维场及三维场电磁参数计算结果比较	314
9.5.2 气隙磁通密度的计算方法	321
9.6 本章小结	323
参考文献	323
附录 源代码	326

第1章 绪 论

无刷直流电动机（以下简称电机）是随着电子技术的迅速发展而发展起来的一种新型直流电机，它是现代工业设备中重要的运动部件。无刷直流电机以法拉第的电磁感应定律为基础，而又以新兴的电力电子技术、数字电子技术和各种物理原理为后盾，具有很强的生命力。

无刷直流电机的最大特点是没有换向器（曾称整流子）和电刷组成的机械接触机构。因此，无刷直流电机没有换向火花，寿命长，运行可靠，维护简便。此外，其转速不受机械换向的限制，如采用磁悬浮轴承或空气轴承等，可实现每分钟几万到几十万转的超高转速运行。

由于无刷直流电机具有上述一系列优点，因此，它的用途比有刷直流电机更广泛，尤其适用于航空航天、电子设备、采矿、化工等特殊工业部门。

1.1 无刷直流电机的特点

1831年，法拉第发现了电磁感应现象，奠定了现代电机的基本理论基础。从19世纪40年代研制成功第一台直流电机，经过大约17年的时间，直流电机技术才趋于成熟。随着应用领域的扩大，对直流电机的要求也就越来越高，有接触的机械换向装置限制了有刷直流电机在许多场合中的应用。为了取代有刷直流电机的电刷-换向器结构的机械接触装置，人们曾对此作过长期的探索。1915年，美国人Langnall发明了带控制栅极的汞弧整流器，制成了由直流变交流的逆变装置。20世纪30年代，有人提出用离子装置实现电机的定子绕组按转子位置换接的所谓换向器电机，但此种电机由于可靠性差、效率低、整个装置笨重又复杂而无实用价值。

科学技术的迅猛发展，带来了电力半导体技术的飞跃。开关型晶体管的研制成功，为创造新型直流电机——无刷直流电机带来了生机。1955年，美国人Harrison首次提出了用晶体管换相线路代替电机电刷接触的思想，这就是无刷直流电机的雏形。它由功率放大部分、信号检测部分、磁极体和晶体管开关电路等组成，其工作原理是当转子旋转时，在信号绕组中感应出周期性的信号电动势，此信号电动势分别使晶体管轮流导通实现换相。问题在于，首先，当转子不转时，信号绕组内不能产生感应电动势，晶体管无偏置，功率绕组也就无法馈电，所以这种无刷直流电机没有起动转矩；其次，由于信号电动势的前沿陡度不大，

晶体管的功耗大。为了克服这些弊病，人们采用了离心装置的换向器，或采用在定子上放置辅助磁钢的方法来保证电机可靠地起动。但前者结构复杂，而后者需要附加的起动脉冲。其后，经过反复的试验和不断的实践，人们终于找到了用位置传感器和电子换相线路来代替有刷直流电机的机械换向装置，从而为直流电机的发展开辟了新的途径。20世纪60年代初期，接近开关式位置传感器、电磁谐振式位置传感器和高频耦合式位置传感器相继问世，之后又出现了磁电耦合式和光电式位置传感器。半导体技术的飞速发展，使人们对1879年美国人霍尔发现的霍尔效应再次发生兴趣，经过多年的努力，终于在1962年试制成功了借助霍尔元件（霍尔效应转子位置传感器）来实现换相的无刷直流电机。在20世纪70年代初期，又试制成功了借助比霍尔元件的灵敏度高千倍左右的磁敏二极管实现换相的无刷直流电机。在试制各种类型的位置传感器的同时，人们试图寻求一种没有附加位置传感器结构的无刷直流电机。1968年，德国人W·Mieslinger提出采用电容移相实现换相的新方法。在此基础上，德国人R·Hanitsch试制成功借助数字式环形分配器和过零鉴别器的组合来实现换相的无位置传感器无刷直流电机。

无刷直流电机按照工作特性，可以分为两大类：

1. 具有直流电机特性的无刷直流电机

反电动势波形和供电电流波形都是矩形波的电机，称为矩形波同步电机，又称无刷直流电机。这类电机由直流电源供电，借助位置传感器来检测主转子的位置，由所检测出的信号去触发相应的电子换相线路以实现无接触式换相。显然，这种无刷直流电机具有有刷直流电机的各种运行特性。

2. 具有交流电机特性的无刷直流电机

反电动势波形和供电电流波形都是正弦波的电机，称为正弦波同步电机。这类电机也由直流电源供电，但通过逆变器将直流电转换成交流电，然后去驱动一般的同步电机。因此，它们具有同步电机的各种运行特性。

严格来说，只有具有直流电机特性的电机才能称为无刷直流电机，本书主要讨论这种类型的无刷直流电机。

1.2 无刷直流电机的结构和工作原理

本节将讨论无刷直流电机的结构和工作原理，着重介绍各种类型的转子位置传感器、电枢绕组和电子换相线路的组合方式，以及不同换相方式的无刷直流电机。

1.2.1 永磁无刷直流电机的结构

众所周知，有刷直流电机具有旋转的电枢和固定的磁场，因此有刷直流电机

必须有一个滑动的接触机构——电刷和换向器，通过它们把电流馈给旋转着的电枢。无刷直流电机却与有刷直流电机相反，它具有旋转的磁场和固定的电枢。这样，电子换相线路中的功率开关器件，如晶闸管、晶体管、功率 MOSFET 或 IGBT（绝缘栅双极型晶体管）等可直接与电枢绕组连接。在电机内，装有一个转子位置传感器，用来检测转子在运行过程中的位置。它与电子换相线路一起，替代了有刷直流电机的机械换向装置。综上所述，无刷直流电机由电机本体、转子位置传感器和电子换相线路三大部分组成，如图 1-1 所示。

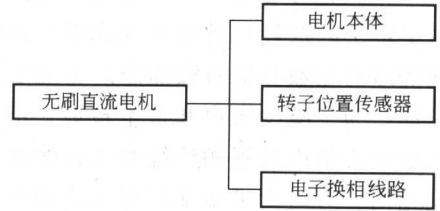


图 1-1 无刷直流电机组成框图

图 1-2 和图 1-3 所示分别为两个典型的无刷直流电机的外观。

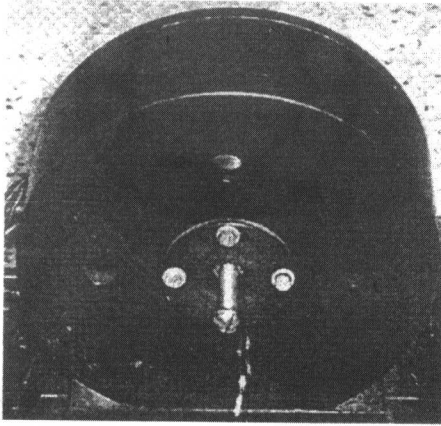


图 1-2 无刷直流电机外观之一

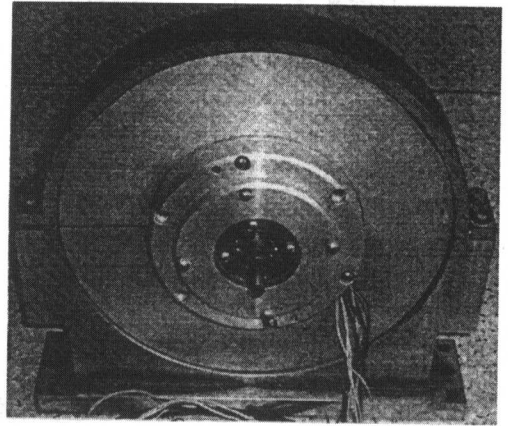


图 1-3 无刷直流电机外观之二

1.2.1.1 电机本体

电机本体的主要部件有转子和定子。首先，它们必须满足电磁方面的要求，保证在工作气隙中产生足够的磁通，电枢绕组允许通过一定的电流，以便产生一定的电磁转矩。其次，要满足机械方面的要求，保证机械结构牢固和稳定，能传送一定的转矩，并能经受住一定环境条件的考验。此外，还要考虑节约材料、结构简单紧凑、运行可靠和温升不超过规定的范围等要求。图 1-4 给出了无刷直流电机结构示意图。

1. 定子

定子是电机本体的静止部分，由导磁的定子铁心、导电的电枢绕组及固定铁心和绕组用的一些零部件、绝缘材料、引出部分组成，如机壳、绝缘片、槽

楔、引出线及环氧树脂等。

(1) 定子铁心 定子铁心一般由硅钢片叠成，取用硅钢片的目的是为了减少主定子的铁耗。硅钢片冲成带有齿槽的环形冲片，在槽内嵌放电枢绕组，槽数视绕组的相数和极对数而定。为减少铁心的涡流损耗，冲片表面涂绝缘漆或磷化处理。为了减少噪声和寄生转矩，定子铁心采用斜槽，一般斜一个槽距。在叠装后的铁心槽内放置槽绝缘和电枢线圈，然后整形、浸漆，最后把主定子铁心压入机壳内。有时为了增加绝缘和机械强度，还需要采用环氧树脂进行灌封。

图 1-5 所示为图 1-2 所示无刷直流电机的定子铁心冲片，此产品的极对数 $p=1$ ，绕组为三相。

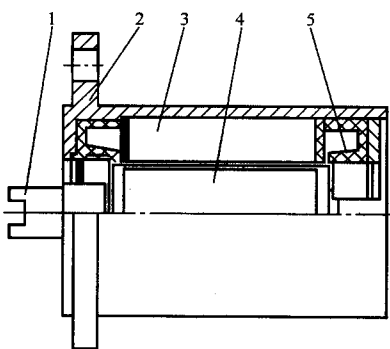


图 1-4 无刷直流电机结构示意图

1—转轴 2—机壳 3—定子铁心
4—磁钢 5—轴承

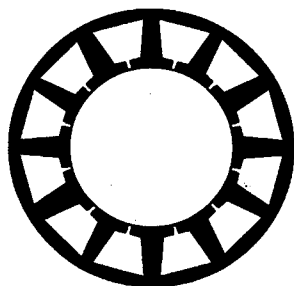


图 1-5 定子铁心冲片

(2) 定子绕组 定子绕组是电机本体的一个重要部件。当电机接上电源后，电流流入绕组，产生磁动势，后者与转子产生的励磁磁场相互作用而产生电磁转矩。当电机带着负载转起来以后，便在绕组中产生反电动势，吸收一定的电功率，并通过转子输出一定的机械功率，从而实现了将电能转换成机械能的过程。显然，绕组在实现能量的转换过程中起着极其重要的作用。因此，对绕组的要求为：一方面它能够通过一定的电流，产生足够的磁动势以得到足够的转矩；另一方面要求结构简单，运行可靠，并应尽可能节省材料。

绕组一般分为集中绕组和分布绕组两种：前者工艺简单，制造方便，但因绕组集中在一起，空间利用率差，发热集中，对散热不利；后者工艺较复杂，但能克服前者的一些不足。绕组由许多线圈连接而成。每个线圈也叫绕组元件，由漆包线在绕线模上绕制而成。线圈的直线部分放在铁心槽内，其端接部分有两个出线头，把各个线圈的出线头按一定规律连接起来，即得到主定子绕组。图 1-6 所示为图 1-2 所示无刷直流电机的定子绕组的接线。

2. 转子

主转子是电机本体的转动部分，是产生励磁磁场的部件，它由三部分组成：永磁体、导磁体和支撑零部件。

永磁体和导磁体是产生磁场的核心，由永磁材料和导磁材料组成。无刷直流电机常采用的永磁材料有以下几种：铝镍钴、铁氧体、钕铁硼及高磁能积的稀土钴永磁材料等。导磁材料一般用硅钢、电工纯铁或 1J50 坡莫合金等。

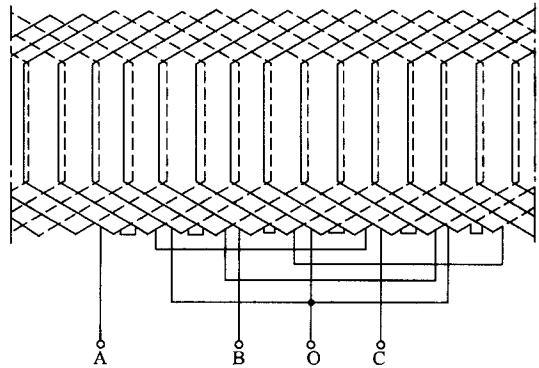


图 1-6 主定子绕组

机械支撑零部件主要是指转轴、轴套和压圈等，它们起固定永磁体和导磁体的作用。转轴由非导磁材料，如圆钢或玻璃钢棒等车磨而成，要求它具有一定的机械强度和刚度。轴套和压圈通常由黄铜或铝等非导磁材料做成。

1.2.1.2 电子换相线路

电子换相线路和位置传感器相配合，起到与机械换向类似的作用。所以，电子换相线路也是无刷直流电机实现无接触换向的两个重要组成部分之一。

电子换相线路的任务是将位置传感器的输出信号进行解调、预放大、功率放大，然后去触发末级功率晶体管，使电枢绕组按一定的逻辑程序通电，保证电机的可靠运行。

一般来说，对电子换相线路的基本要求是：线路简单、运行稳定可靠、体积小、重量轻、功耗小，同时能按照位置传感器的信号进行正确换向和控制，能够实现电机的正反转，并且能满足不同环境条件和长期运行的要求。

1.2.2 无刷直流电机的原理

无刷直流电机是在有刷直流电机的基础上发展起来的，就它们内部发生的电磁过程来说，本质上无多大差别。因此，下面先介绍一下有刷直流电机的工作原理。

有刷直流电机主要由静止部分磁极体、转动部分电枢以及电刷和换向器等组成，如图 1-7 所示。图中，N、S 为磁极体，线圈 abcd 组成电枢，电刷 A、B 和换向片 II 组成机械换向机构。

当接上电源后，电流 I 从电刷 A 流进去，经过换向片 I、线圈 abcd 至换向片 II，然后由电刷 B 流出。根据毕奥·萨伐尔定律：如果磁场中有一载流导体，

且导体与磁场方向相互垂直,则作用在载导体上的电磁力应为 $f = IBl_a$, 其中, I 为流过导体的电流; B 为磁通密度; l_a 为载导体的有效长度。这个力形成了作用在线圈上的电磁转矩。根据左手定则,线圈在这个电磁转矩的作用下,将按逆时针方向转动。当载导体转过 180° 电角度后,电流 I 还是从电刷 A 进去,经由换向片 I、线圈 dcba, 至换向片 II, 最后仍从电刷 B 流出。可见,在有刷直流电机中,就是借助电刷—换向片,使得在某一磁极下,虽然导体在不断更替,但只要外加电压的极性不变,则导体中流过的电流方向始终不变,作用在电枢上的电磁转矩的方向始终不变,电机的旋转方向也始终不变,这就是有刷直流电机的机械换相过程。

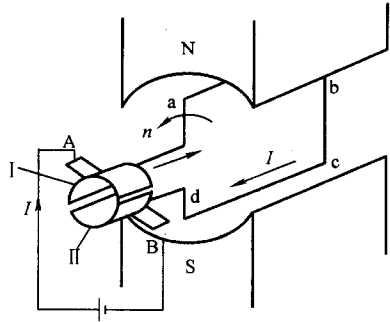


图 1-7 有刷直流电机的原理图

在无刷直流电机中,借助反映主转子位置的位置传感器的输出信号,通过电子换相线路去驱动与电枢绕组连接的相应的功率开关器件,使电枢绕组依次馈电,从而在定子上产生跳跃式的旋转磁场,驱动永磁转子旋转。随着转子的转动,位置传感器不断地送出信号,以改变电枢绕组的通电状态,使得在某一磁极下导体中的电流方向始终保持不变,这就是无刷直流电机的无接触式换相过程,图 1-8 为无刷直流电机工作原理框图。

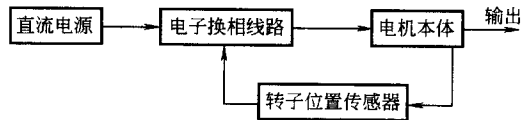


图 1-8 无刷直流电机工作原理框图

应该指出,在无刷直流电机中,电枢绕组和相应的功率开关器件的数目不可能很多,所以与有刷直流电机相比,它产生的电磁转矩波动比较大。

1.2.2.1 电枢绕组的联结方式

无刷直流电机的电枢绕组与交流电机的定子绕组类似,基本上有星形绕组和封闭式绕组两类,它们的换相线路一般也有桥式和非桥式之分。这样,电枢绕组与换相线路相组合时,其形式是多种多样的,归纳起来可分为下列几种:

1. 星形绕组

星形联结是把所有绕组的首端或尾端接在一起,与它们相配合的电子换相线路可以为桥式联结,也可以为非桥式联结,前者如图 1-9 的 a、b 所示,后者如图 1-9 的 c~e。

2. 封闭式绕组

封闭式绕组是由各相绕组组成封闭形,即第一相绕组的尾端与第二相绕组的

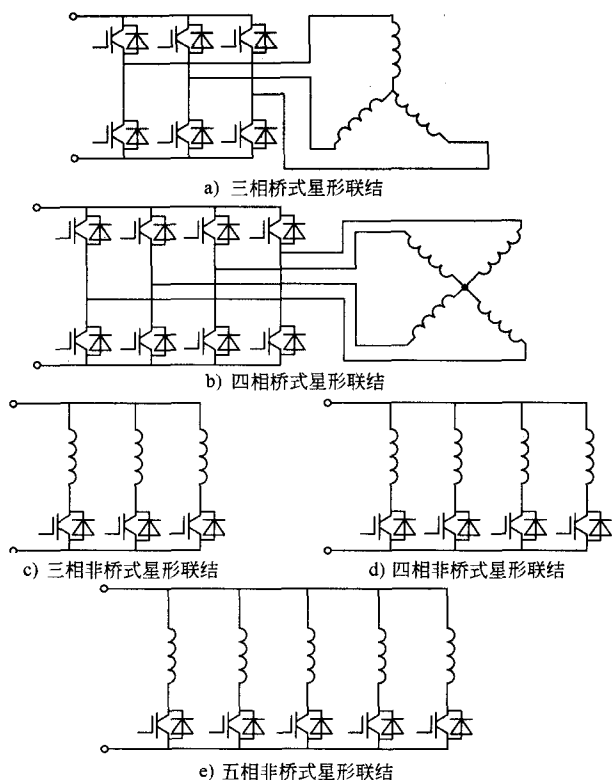


图 1-9 绕组星形联结

首端相连接，第二相绕组的尾端再与第三相绕组的首端相连接，依次类推，直至最后一相绕组的尾端又与第一相绕组的首端相连接。与它们相配合的电子换相线路为桥式，图 1-10a 所示为三相封闭式桥式联结，而图 1-10b 所示为四相封闭式桥式联结。

3. 特殊联结的绕组

这种绕组的联结方法比较特殊，其连接如图 1-11 所示。

1.2.2.2 换相

在无刷直流电机中，来自位置传感器的驱动信号，按照一定的逻辑使某些功

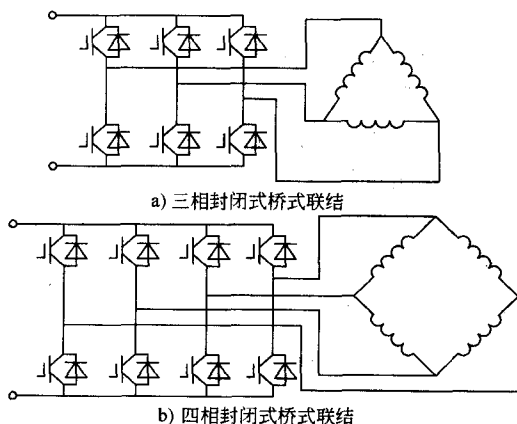


图 1-10 绕组封闭式联结